

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE BIODIESEL E
BIOGÁS A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS

Santos
2021

BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE BIODIESEL E
BIOGÁS A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Petróleo. Orientado pela Prof.^a Dr.^a Flávia
Talarico Saia.

Santos

2021

BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE BIODIESEL E
BIOGÁS A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Petróleo. Orientado pela Prof.^a Dr.^a Flávia
Talarico Saia.

APROVADO EM: __ / __ / __

BANCA EXAMINADORA

Prof.(a) Dr.(a)

Prof.(a) Dr.(a)

Prof.(a) Dr.(a)

Ficha catalográfica elaborada por sistema automatizado
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48a Alves de Oliveira, Bruno.
 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO SIMULTÂNEA DE
BIODIESEL E BIOGÁS A PARTIR DA BIOMASSA DE
MICROALGAS. / Bruno Alves de Oliveira; Orientadora
Flávia Talarico Saia; Coorientador . -- Santos,
2021.
 45 p. ; 30cm

 TCC (Graduação - Engenharia de Petróleo) --
Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo,
2021.

 1. Análise Econômica. 2. Biocombustíveis. 3.
Biogás. 4. Microalgas. 5. Simulação Monte Carlo. I.
Saia, Flávia Talarico, Orient. II. Título.

CDD 665.5

Dedico este trabalho a todos os professores, pois foi através deles que obtive o conhecimento necessário à realização deste trabalho e, certamente, também através deles, os pesquisadores conseguiram elaborar suas pesquisas que serviram aqui como referências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o aprendizado e vitórias adquiridos durante esta jornada;

À minha família, pelo apoio incondicional;

À professora e orientadora Flávia pelas sugestões, críticas, ensinamentos. Obrigado também por proporcionar a realização do estágio supervisionado obrigatório no Laboratório de Bioprocessos do Departamento de Ciências do Mar da Unifesp;

À professora Cláudia do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FEI por todo o aprendizado que me proporcionou à realização deste trabalho e pela gentileza quanto à utilização do *software* de simulação;

Ao professor Juan Alba pela generosidade e pelas preciosas dicas;

A todo Instituto do Mar, com professores e funcionários brilhantes que fizeram parte da minha trajetória como aluno;

Aos professores que me tiveram como monitor em suas disciplinas: Liliane e Emiliano (Geologia); Gilberto (Cartografia e Geoprocessamento) e Gyrlene (Ciências Atmosféricas);

A todos os alunos, professores e técnicos que me ajudaram na fundação da empresa júnior IMar Jr.

Agradeço também aos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta importante etapa acadêmico-profissional.

SEMPRE AVANTE!

“Let me bring you songs from the wood:
to make you feel much better than you could
know.

Dust you down from tip to toe.
Show you how the garden grows.
Hold you steady as you go.”

Jethro Tull

RESUMO

As microalgas são organismos de rápido crescimento com potencial demonstrado para a produção de biocombustíveis. A rota do biodiesel de microalgas vem sendo estudada há muitos anos, mostrando-se uma alternativa ao diesel de petróleo. Todavia, a necessidade de altos investimentos em capital e operação é o grande desafio à comercialização do biodiesel de microalgas. Alguns trabalhos já foram realizados no sentido de investigar a produção simultânea de biodiesel e biogás como forma de aumentar o retorno financeiro dos projetos, porém nenhum destes foi realizado no Brasil. Além disso, a grande parte dos estudos econômicos em relação aos biocombustíveis de microalgas apresenta uma contabilidade tradicional estimando valores fixos, o que gera perda de qualidade dos resultados. Portanto, este trabalho visa avaliar economicamente a produção simultânea de biodiesel e biogás a partir das microalgas aplicando técnicas de Simulação Monte Carlo (SMC) como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica. O modelo econômico foi elaborado a partir da construção detalhada das despesas de capital (Capex), despesas operacionais (Opex), custeio de cada etapa do processo produtivo e análise probabilística das variáveis de risco. Após a simulação econômica com 100 mil avaliações, estima-se que a integração do biodiesel e biogás aumentam o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). A análise de sensibilidade aponta para uma elevada dependência do projeto ao preço do biodiesel e ao alto custo dos fotobiorreatores (PBRs).

Palavras-chave: Análise Econômica. Biocombustíveis. Biogás. Microalgas. Simulação Monte Carlo.

ABSTRACT

Microalgae are fast-growing organisms with demonstrated potential for biofuel production. The microalgae biodiesel route has been studied for many years, proving to be an alternative to petroleum diesel. However, the need for high investments in capital and operation is the major challenge to the commercialization of microalgae biodiesel. Some studies have already been carried out to investigate the simultaneous production of biodiesel and biogas as a way to increase the financial return of projects, but none of these were carried out in Brazil. In addition, most economic studies in relation to microalgae biofuels present a traditional accounting estimating fixed values, which generates loss of quality of results. Therefore, this work aims to economically evaluate the simultaneous production of biodiesel and biogas from microalgae by applying Monte Carlo Simulation (MCS) techniques as a means of integrating risk analysis into the economic evaluation process. The economic model was elaborated from the detailed construction of capital expenditures (Capex), operating expenses (Opex), costing of each stage of the production process and probabilistic analysis of risk variables. After the economic simulation with 100,000 evaluations, it is estimated that the integration of biodiesel and biogas increase the Net Present Value (NPV) and the Internal Rate of Return (IRR). Sensitivity analysis points to a high dependence of the project on the price of biodiesel and the high cost of photobioreactors (PBRs).

Keywords: Economic analysis. Biofuels. Biogas. Microalgae. Monte Carlo Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo integrado biodiesel-biogás.....	19
Figura 2 - Série histórica da inflação anual no Brasil	27
Figura 3 - Histórico de preços do biodiesel no Brasil	27
Figura 4 - Preço da glicerina para venda no Brasil.....	28
Figura 5 - Distribuição Weibull da “inflação anual média”	29
Figura 6 - Distribuição Weibull do “preço da glicerina”.....	30
Figura 7 - Distribuição Lognormal do “preço do biodiesel”	31
Figura 8 - Comparação entre as distribuições de frequências do VPL.....	35
Figura 9 - Gráfico de sensibilidade do VPL (convencional).....	36
Figura 10 - Gráfico de sensibilidade do VPL (biodiesel-biogás)	37
Figura 11 - Gráfico da alocação de capital específica (%) no processo convencional.....	39
Figura 12 - Gráfico da alocação de capital específica (%) no processo biodiesel-biogás.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Premissas do modelo econômico	22
Tabela 2 - Capex total do processo convencional	24
Tabela 3 - Capex total do processo integrado.....	24
Tabela 4 - Opex total anual do processo convencional	25
Tabela 5 - Opex total anual do processo integrado	26
Tabela 6 - Pressupostos de modelo com distribuição Triangular.....	32

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. 1.....	21
Eq. 2.....	23
Eq. 3.....	29
Eq. 4.....	30
Eq. 5.....	31
Eq. 6.....	31
Eq. 7.....	32
Eq. 8.....	33
Eq. 9.....	33

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BCB	Banco Central do Brasil
Capex	<i>Capital Expenditure</i> (despesas de capital)
DA	Digestão Anaeróbia
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (steres metlicos de ácidos graxos)
Opex	<i>Operational expenditure</i> (despesas operacionais)
PBR	<i>Photobioreactor</i> (fotobiorreator)
PDF	Função densidade de probabilidade
SMC	Simulação Monte Carlo
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	19
3.2	DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE INTEGRAÇÃO.....	20
3.3	ANÁLISE ECONÔMICA.....	21
3.3.1	Estimativa de custos	22
3.3.1.1	<i>Despesas de capital - Capex</i>	22
3.3.1.2	<i>Despesas operacionais - Opex</i>	25
3.3.1.3	<i>Pressupostos econômicos</i>	26
3.3.2	Análise estatística sobre os pressupostos econômicos	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

As microalgas são organismos unicelulares de rápido crescimento e eficientes fixadores de CO₂ atmosférico, cujo cultivo não necessita de grandes extensões de terra. A literatura pertinente mostra o potencial de utilização de microalgas na redução de nutrientes (p.ex. nitrogênio, fósforo e potássio) em sistemas de tratamento de águas residuárias, promovendo assim o tratamento terciário dessa água (MARTINEZ *et al.*, 2000; DE-BASHAN *et al.*, 2002; ASLAN; KAPDAN, 2006; LI *et al.*, 2010, NAGABALAJI *et al.*, 2017).

A partir da biomassa das microalgas, que *in natura* pode servir de insumo animal (ração) e fertilizante, é possível obter biodiesel, biometano (biogás rico em metano), bio-hidrogênio, bio-etanol e bio-eletricidade (ENAMALA *et al.*, 2018). Além disso, as algas promovem parte do tratamento de águas residuárias e podem também servir para a extração de produtos de alto valor agregado, tais como β -caroteno, Astaxantina, Luteína, Ficobiliproteína, β -glucano, Ácido docosaenoico (DHA), Ácido eicosapentaenoico (EPA), anticorpos, hormônios, Clorofila, vitaminas, minerais e suplementos alimentares (KOLLER, 2015).

Uma vantagem na utilização das microalgas deve-se à sua biomassa não ser lignocelulósica, como demonstrado por Cheali *et al.* (2016), cujo extenso trabalho de avaliação do risco econômico através de comparações de oito diferentes conceitos de biorrefinarias de produção de biocombustíveis e bioprodutos, mostrou que o bioetanol lignocelulósico não é economicamente viável (VPL negativo) em períodos de baixa nos preços do petróleo e que as microalgas podem ser uma alternativa pela qualidade da matéria-prima.

A rota do biodiesel de microalgas vem sendo estudada há muitos anos, mostrando potencial alternativa ao diesel de petróleo (CHISTI, 2007a; BRENNAN; OWENDE, 2010; HALIM; DANQUAH; WEBLEY, 2012; MILANO *et al.*, 2016). Todavia, estudos econômicos apresentam desafios na comercialização do biodiesel de microalgas, principalmente a necessidade de elevados investimentos em capital e operação (RICHARDSON; OUTLAW; ALLISON, 2010; BATAN; GRAFF; BRADLEY, 2016; BRAVO-FRITZ *et al.* 2016; BAUDRY; MACHARIS; VALLÉE, 2018).

A integração de processos, na escala de biorrefinarias, pode melhorar o desempenho econômico dos projetos (JANKOWSKA; SAHU; OLESKOWICZ-POPIEL, 2017). Por exemplo, a produção de biogás, rico em metano (CH₄), a partir da digestão anaeróbia (DA) da biomassa, é uma alternativa, integrando-se o biogás a outros processos como o tratamento de

água residuária ou à produção de biodiesel (SIALVE; BERNET; BERNARD, 2009; WARD; LEWIS; GREEN, 2014; GONZALEZ-FERNANDEZ; SIALVE; MOLINUEVO-SALCES, 2015). Outros compostos presentes na biomassa algal, como por exemplo carboidratos, proteínas, vitaminas, minerais, carotenoides, ômega-3 de longa cadeia e fitonutrientes, podem ser interessantes do ponto de vista industrial (CHEN *et al.*, 2016).

No Brasil, o biodiesel a partir de microalgas ainda não está sendo produzido em escala comercial. Os dados de produtividade das microalgas sequer constam nos relatórios da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2017), sendo o biodiesel produzido predominantemente a partir da biomassa vegetal (soja, palma, dendê, algodão e canola) e da gordura animal (bovina, suína e frango).

Na literatura sobre o tema, existe uma escassez de estudos econômicos estocásticos envolvendo projetos de biorrefinarias. Destaca-se o estudo pioneiro de Richardson, Outlaw e Allison (2010), onde, segundo os autores, em 2010 já havia muitos trabalhos mostrando a produtividade das microalgas, porém poucos estudos mostrando as estimativas de custo da produção. Batan, Graff e Bradley (2016) relataram que a maioria dos estudos de avaliação econômica apresentavam uma contabilidade tradicional de custos e investimentos de capital, onde os resultados entre estes estudos eram divergentes e de difícil cruzamento de informações de modo que os custos são considerados como constantes. Isto é reforçado por Santibañez-Aguilar *et al.* (2016). Além disso, não há estudos sobre a produção simultânea de biodiesel e biogás a partir de microalgas no Brasil.

Richardson *et al.* (2014a e 2014b) relataram potencial positivo para a comercialização de biodiesel de microalgas. Todavia, as projeções estatísticas foram construídas com base em apenas 500 simulações e considerando um tempo de 10 anos de produção, mostrando que esse tipo de avaliação pode ser melhorado utilizando maior processamento computacional, ou seja, aumentando-se o número de avaliações para uma melhor análise estatística, além de projetar uma produção em maior tempo, aproximando mais os modelos à realidade dos projetos de larga escala.

A Simulação Monte Carlo (SMC) é o termo dado aos modelos de simulação que tem uma ou mais variáveis estocásticas. A técnica de SMC permite gerar aleatoriamente centenas de valores amostrais dessas distribuições para calcular os impactos de diferentes valores para as variáveis de risco na viabilidade econômica do sistema simulado (MIORANDO, 2010). Este

procedimento é reforçado por Cheali *et al.* (2016) que propuseram utilizar a SMC para a caracterização das incertezas de entrada, amostragem, avaliações de modelos e análise de saída das incertezas.

Samanez (2009), define a SMC como um método de ensaios estatísticos, em que os valores são estabelecidos por meio de uma seleção aleatória, na qual a probabilidade de escolher determinado resultado entre todos os possíveis é obtida a partir de uma amostragem aleatória de identificação de eventos. Na análise de risco, é possível calcular uma distribuição de probabilidades associada a um resultado do fluxo de caixa (VPL e TIR). Com a distribuição probabilística é possível se calcular as chances do projeto se tornar inviável, fornecendo subsídios para decidir entre as alternativas que possuem diferentes graus de risco. As técnicas usuais de se trabalhar com o risco são:

- a) distribuição de probabilidades;
- b) simulação do fluxo de caixa;
- c) árvore de decisão.

A SMC é uma técnica alternativa promissora para estimar um valor esperado. A ideia é estimar a distribuição de uma estatística extraindo amostras aleatórias de uma população e observar o comportamento da estatística sobre as amostras. O método possui muitas aplicações, como por exemplo calcular integrais ou simular alguns eventos discretos (MIORANDO, 2010).

Richardson, Johnson e Outlaw (2012) recomendam que a modelagem dos sistemas de produção com microalgas substitua as estimativas pontuais (ou suposições) para as variáveis de risco com distribuições de probabilidade, diferentemente da contabilidade tradicional determinística como realizada por Chisti (2007b). Esta recomendação também foi feita mais recentemente por Lee *et al.* (2019).

Portanto, o presente trabalho visa apresentar um estudo pioneiro sobre a integração do biodiesel e biogás, estimando uma produção em larga escala no Brasil e utilizando técnicas SMC para incorporar a análise de risco no processo de avaliação econômica em projetos de baixo impacto ambiental.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma avaliação econômica da produção simultânea de biodiesel e biogás a partir da biomassa de microalgas através da modelagem e simulação econômica do processo produtivo.

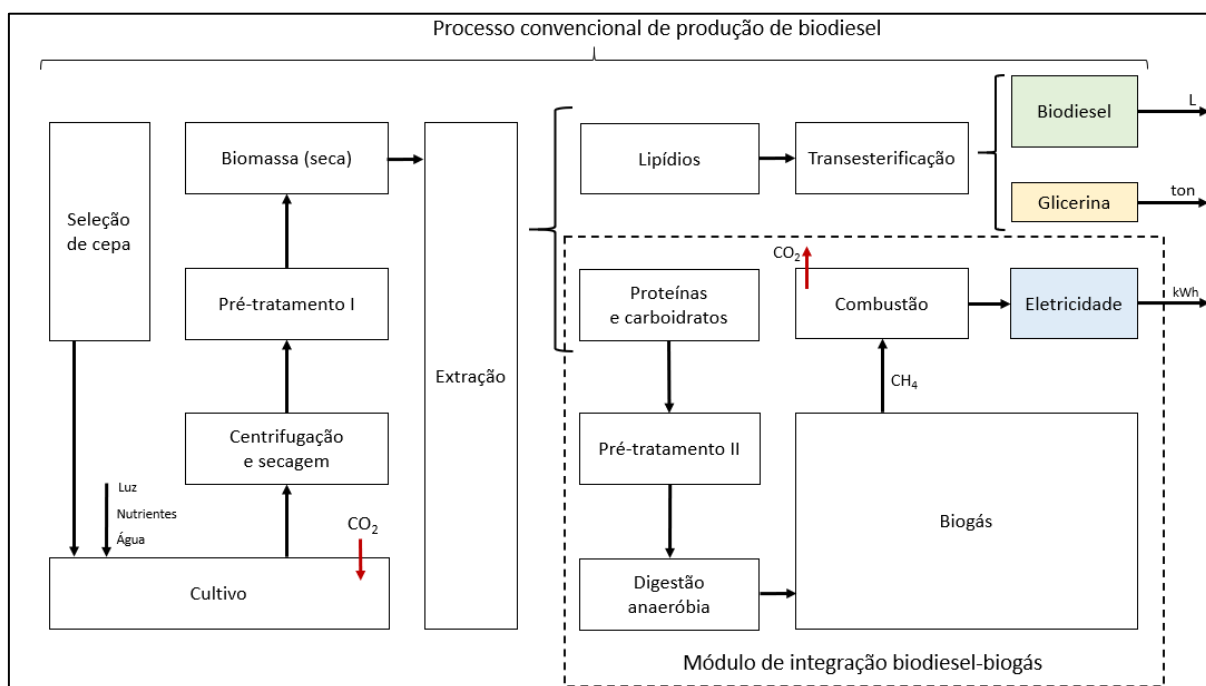
Os objetivos específicos são:

- a) desenvolver o modelo econômico para a tomada de decisões;
- b) ampliar a discussão sobre os desafios da produção de biodiesel e de biogás, simultaneamente produzidos a partir de microalgas no Brasil.

3 METODOLOGIA

Neste tópico é descrito o processo de produção do biodiesel a partir de microalgas. O processo convencional, adotado como sendo o modelo base para a análise econômica comparativa, é composto de várias etapas e tem como produtos o biodiesel e a glicerina para venda. Já o processo integrado biodiesel-biogás é a soma do processo convencional com o módulo de integração, que pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Processo integrado biodiesel-biogás



Fonte: o autor

Legenda: o CO₂ (destacado em vermelho) gerado na combustão do metano é transportado para o cultivo; o pré-tratamento I é a ruptura celular para a extração de lipídios; e o pré-tratamento II é a preparação das frações de proteínas e carboidratos para a digestão anaeróbia (DA)

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo convencional de produção do biodiesel de microalgas, neste trabalho, foi construído a partir do estudo de Davis, Aden e Pienkos (2011), onde se projetou um alcance de produção anual de 10 milhões de galões de lipídios (bio-óleo) e operação da planta em 330 dias por ano. Os autores estimaram estas características a partir de dados publicados nos relatórios

anuais de biocombustíveis do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL, do inglês *National Renewable Energy Laboratory*) dos Estados Unidos.

No presente trabalho, considerou-se que as microalgas são cultivadas em PBRs tubulares, onde são fornecidos água através de bombeio, nutrientes e luz por sistema de iluminação artificial. Conforme relatado por Batan, Graff e Bradley (2016), assume-se uma demanda por CO₂ de 2,0 kg·kg⁻¹ de biomassa que é fornecido por um sistema de injeção de gás.

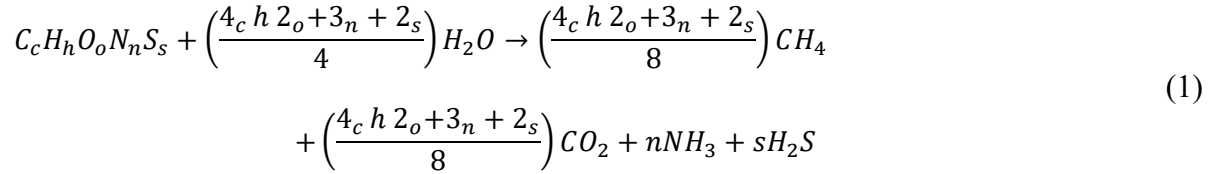
Uma vez atingido o crescimento desejado das microalgas, a biomassa é concentrada em tanques de sedimentação, depois é recuperada através de centrifugação e, por fim, seca em estufas. Após isso, a biomassa seca é pré-tratada para que ocorra a extração dos lipídios através do método por solventes orgânicos (no caso, o hexano). Quando a biomassa entra em contato com o hexano, provoca a ruptura da parede celular e os conteúdos são removidos (ACIÉN *et al.*, 2017). Já a extração lipídica é feita de forma convencional por hexano e isopropanol, com uma taxa de perda de 2% para ambos e 6% de perda de triglicerídeos, totalizando 10% (BATAN, GRAFF E BRADLEY, 2016).

Após a extração, os lipídios são submetidos à reação de transesterificação, que transforma os ácidos graxos em biodiesel e glicerina. Como amplamente discutido por Lôbo *et al.* (2009), neste trabalho foi assumida uma transesterificação convencional via catalizador homogêneo alcalino (NaOH) por proporcionar custo e rendimento da reação satisfatórios; e metanol por promover uma menor dispersão da glicerina no biodiesel, facilitando a sua separação em relação ao etanol. O rendimento estimado para a reação de transesterificação foi de 90% para o biodiesel, sendo 8% para glicerina e 2% em resíduos. A produção de glicerina foi estimada conforme a produtividade relatada em Lôbo *et al.* (2009).

3.2 DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE INTEGRAÇÃO

Após a extração de lipídios, o resíduo gerado é composto por proteínas e carboidratos. Conforme discutido no trabalho de Harun *et al.* (2011), esse material é submetido a pré-tratamento para que possa sofrer a digestão anaeróbia e posterior produção de gás metano cuja combustão fornecerá energia elétrica limpa. A produção de energia elétrica assumida neste trabalho foi estimada por Harun *et al.* (2011) no cenário onde o metano é produzido somente através da digestão anaeróbia das frações de proteínas e carboidratos.

O rendimento da produção de biogás pode ser obtido por meio de uma fórmula estequiométrica, como sugerido por Bravo-Fritz *et al.* (2016), que estimaram a produção de metano em 40%, como representado na Eq. 1:



Um limitante deste estudo foi a estimativa precisa da quantidade de energia elétrica consumida em cada etapa para a elaboração de um cenário onde a eletricidade produzida no módulo de integração pudesse suprir total ou parcialmente as demandas de consumo em todo o processo. Para contornar esta dificuldade, optamos por precificar a energia elétrica produzida e considerá-la como receita no fluxo de caixa.

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Uma série de premissas (Tabela 1) foram assumidas neste trabalho como entradas do modelo econômico. Estas premissas foram utilizadas por Davis, Aden e Pienkos (2011); e Nagarajan *et al.* (2013).

Tabela 1 - Premissas do modelo econômico

<i>Variável econômica/entrada</i>	<i>Valor</i>
Taxa de imposto	35%
Período analisado	20 anos
Período de depreciação da planta	15 anos
Tempo para produção total	0,25 anos
Taxa de desconto para o Valor Presente Líquido	10%
Perda de capital em valor de equipamento por ano	5%
Depósito	1,5% do Capital Instalado Total (TIC)
Desenvolvimento de site	9% do TIC
Trabalho e construção	25% do TIC
Contingência	30% do TIC
Custos redistribuíveis	10% do TIC
Despesas de campo	10% do TIC
Seguros e impostos	1,5% do TIC
Manutenção	2% dos custos de equipamento
Despesas gerais	60% dos custos de mão-de-obra

Fonte: o autor

3.3.1 Estimativa de custos

3.3.1.1 Despesas de capital - Capex

O custo de capital assumido neste trabalho foi de 6,5%. A estimativa de custos foi realizada para comparar o processo convencional de produção de biodiesel a partir de microalgas com o processo integrado biodiesel-biogás. Os equipamentos do processo convencional de produção do biodiesel são compostos por PBRs tubulares, bombas, compressores, refrigeradores, centrífugas, tanques, aquecedores, armazenamento (lipídios, biodiesel, glicerina e resíduos), materiais para o pré-tratamento (solvente, reatores de hidrotratamento), materiais para extração, materiais para padrão de qualidade.

Além disso, as despesas de capital incluem custos indiretos, tais como trabalho e construção, desenvolvimento de site e custo anual da área. Estimou-se também, com base no estudo de Davis, Aden e Pienkos (2011), o custo indireto anual da mão-de-obra, estimada em 25% do Opex; e outros custos indiretos estimados em 10% do subtotal do Capex, p.ex. o controle de qualidade do biodiesel em atendimento à norma brasileira RANP 45 (ANP, 2014). Assumiu-se uma depreciação dos equipamentos em 10% ao ano, que é um valor usual em projetos desse tipo, como discutido por Nagarajan *et al.* (2013).

Para o processo integrado, os equipamentos são compostos por difusores de gás para combustão, sistema de abastecimento e distribuição de gás, sistema de aquecimento, reator para DA, turbina para a conversão do metano em eletricidade, sistema de distribuição e cilindro para armazenamento do gás.

Os custos dos equipamentos foram estimados a partir de estudos anteriores (OLIVEIRA, 2020) e ajustados para a escala de produção deste trabalho usando a relação dada pela Eq. 2:

$$\frac{C_r}{C_b} = \left(\frac{A_r}{A_b} \right)^n \quad (2)$$

onde, “ C ” é o custo adquirido, “ A ” é o custo do equipamento e “ n ” é o expoente de custo. O “ n ” foi assumido como 0,6 pela “regra dos seis décimos” descritas por Turton *et al.* (2013) para quando não há dados econômicos disponíveis. Os subscritos “ r ” e “ b ” referem-se a atributos dos equipamentos requeridos (r) e básicos (b).

O Capex total estimado para o processo convencional foi de R\$ 233,4 milhões, como pode ser observado com mais detalhes na Tabela 2. Já no processo integrado, o Capex total foi estimado em R\$ 245,8 milhões (Tabela 3), com destaque para o incremento de despesas em capital relativas ao módulo de integração.

Tabela 2 - Capex total do processo convencional

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>	<i>Depreciação - anos</i>	<i>Valor depreciado (R\$)</i>
Cultivo	Fotobiorreator Tubular	36.760.000,00	10%	3.676.000,00
	Sistema de bombeamento de água	7.811.500,00	10%	781.150,00
	Sistema de injeção de CO ₂	6.892.500,00	10%	689.250,00
	Sistema de circulação cultivo	2.757.000,00	10%	275.700,00
	Sistema de iluminação	22.975.000,00	10%	2.297.500,00
Colheita/Secagem	Ar condicionado	4.595.000,00	10%	459.500,00
	Centrifuga	5.743.750,00	10%	574.375,00
	Tanque de sedimentação	16.082.500,00	10%	1.608.250,00
	Estufa	11.487.500,00	10%	1.148.750,00
	Armazenamento	7.811.500,00	10%	781.150,00
Pré-tratamento	Materiais para a lise celular	6.892.500,00	10%	689.250,00
Extração	Materiais para extração	6.433.000,00	10%	643.300,00
Transesterificação	Materiais	2.067.750,00	10%	206.775,00
	Padrão de qualidade	4.595.000,00	10%	459.500,00
	Armazenamento	16.082.500,00	10%	1.608.250,00
SUBTOTAL		R\$ 158.987.000,00		R\$ 15.898.700,00
<i>Custos indiretos</i>				
Desenvolvimento de site		2.225.818,00		
Mao-de-obra	25% do Opex	13.750.044,00		
Trabalho e construção		4.595.000,00		
Outros custos		15.898.700,00		
<i>Capital não depreciável</i>				
Custo da área (ano)		22.056.000,00		
TOTAL Capex		R\$ 233.411.262,00		

Fonte: o autor

Tabela 3 - Capex total do processo integrado

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>	<i>Depreciação - anos</i>	<i>Valor depreciado (R\$)</i>
Cultivo	Fotobiorreator Tubular	36.760.000,00	10%	3.676.000,00
	Sistema de bombeamento de água	7.811.500,00	10%	781.150,00
	Sistema de injeção de CO ₂	6.892.500,00	10%	689.250,00
	Sistema de circulação cultivo	2.757.000,00	10%	275.700,00
	Sistema de iluminação	22.975.000,00	10%	2.297.500,00
Colheita/Secagem	Ar condicionado	4.595.000,00	10%	459.500,00
	Centrifuga	5.743.750,00	10%	574.375,00
	Tanque de sedimentação	16.082.500,00	10%	1.608.250,00
	Estufa	11.487.500,00	10%	1.148.750,00
	Armazenamento	7.811.500,00	10%	781.150,00
Pré-tratamento	Materiais para a lise celular	6.892.500,00	10%	689.250,00
Extração	Materiais para extração	6.433.000,00	10%	643.300,00
Transesterificação	Materiais	2.067.750,00	10%	206.775,00
	Padrão de qualidade	4.595.000,00	10%	459.500,00
	Armazenamento	16.082.500,00	10%	1.608.250,00
Digestão anaeróbia	Difusores de gás para combustão	5.705.000,00	10%	570.500,00
	Abastecimento e distribuição de gás	8.705.000,00	10%	870.500,00
	Sistema de aqueciemetno	5.336.000,00	10%	533.600,00
	Reator de digestão anaeróbia	10.465.028,00	10%	1.046.502,80
	Sistema de distribuição de eletricidade	10.082.000,00	10%	1.008.200,00
	Armazenamento	7.800.000,00	10%	780.000,00
SUBTOTAL		R\$ 207.080.028,00		R\$ 20.708.002,80
<i>Custos indiretos</i>				
Desenvolvimento de site		2.899.120,39		
Mao-de-obra	25% do Opex	14.912.592,75		
Trabalho e construção		5.514.000,00		
Outros custos		20.708.002,80		
<i>Capital não depreciável</i>				
Custo da área (ano)		22.056.000,00		
TOTAL Capex		R\$ 245.784.718,74		

Fonte: o autor

3.3.1.2 Despesas operacionais - Opex

O detalhamento do custeio do Opex foi feito através de estimativa anual para cada etapa do processo de produção do biodiesel. Os custos de operação da planta para o processo convencional são compostos pela injeção de CO₂, consumo de solvente e reagentes, manutenção dos PBRs (10 anos para reposição de tubos), utilidades (refrigeração, água, eletricidade etc.), trabalho e despesas gerais, manutenção, impostos e seguro.

Para o processo integrado, os custos de operação são compostos pelo pré-tratamento das frações de proteínas e carboidratos para a DA, manutenção do reator (digestor), utilidades (refrigeração, água, eletricidade etc.), trabalho e despesas gerais, manutenção, impostos e seguro.

O Opex total estimado para o processo convencional foi de R\$ 55,0 milhões, como pode ser observado com mais detalhes na Tabela 4. Já no processo integrado, o Opex total foi estimado em R\$ 59,7 milhões, como na Tabela 5, com destaque para o incremento de despesas de operação relativas ao módulo de integração.

Tabela 4 - Opex total anual do processo convencional

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>
Produção de lipídio	Injeção de CO ₂	12.422.400,00
	Consumo de solvente	6.211.200,00
	Manutenção do reator (10 anos reposição de tubos)	4.968.960,00
	Utilidades (refrigeração, água, eletricidade etc.)	9.316.800,00
	Trabalho e despesas gerais	7.453.440,00
	Manutenção, impostos e seguro	3.105.600,00
Transesterificação	Reagentes	1.055.904,00
	Utilidades (refrigeração, água, eletricidade etc.)	527.952,00
	Trabalho e despesas gerais	7.453.440,00
	Manutenção, impostos e seguro	2.484.480,00
TOTAL Opex		R\$ 55.000.176,00

Fonte: o autor

Tabela 5 - Opex total anual do processo integrado

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>
Produção de lipídio	Injeção de CO ₂	12.422.400,00
	Consumo de solvente	6.211.200,00
	Manutenção reator (10 anos reposição de tubos)	4.968.960,00
	Utilidades (refrigeração, água, etc)	9.316.800,00
	Trabalho e despesas gerais	7.453.440,00
	Manutenção, impostos e seguro	3.105.600,00
Transesterificação	Reagentes	1.055.904,00
	Utilidades (refrigeração, água, etc)	527.952,00
	Trabalho e despesas gerais	7.453.400,00
	Manutenção, impostos e seguro	2.484.480,00
Digestão anaeróbia	Pré-tratamento da biomassa	1.055.235,00
	Manutenção reator	540.000,00
	Utilidades (refrigeração, água, etc.)	1.320.000,00
	Trabalho e despesas gerais	1.200.000,00
	Manutenção, impostos e seguro	535.000,00
TOTAL Opex		R\$ 59.650.371,00

Fonte: o autor

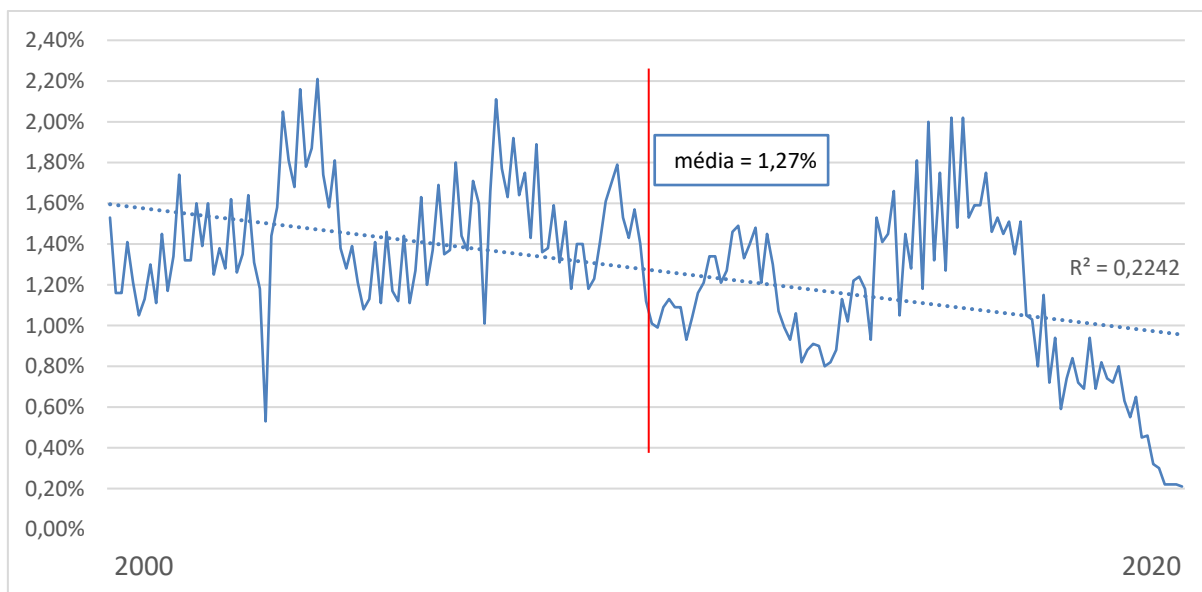
3.3.1.3 Pressupostos econômicos

Este trabalho conduziu uma análise econômica probabilística, aplicando técnicas de SMC como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica. Os pressupostos econômicos que são as variáveis estocásticas, isto é, aquelas que possuem uma distribuição de probabilidades foram:

- inflação anual média;
- preço do biodiesel;
- preço da glicerina;
- produção anual de lipídio;
- produção anual de glicerina;
- produção anual de energia elétrica;
- rendimento da transesterificação;
- tarifa média anual de energia elétrica industrial.

A inflação anual média no Brasil foi estimada a partir da série histórica de 2000 a 2020 do Banco Central do Brasil (BCB, 2020), como representado na Figura 2, que mostra uma tendência de queda. O valor médio foi de 1,27%.

Figura 2 - Série histórica da inflação anual no Brasil

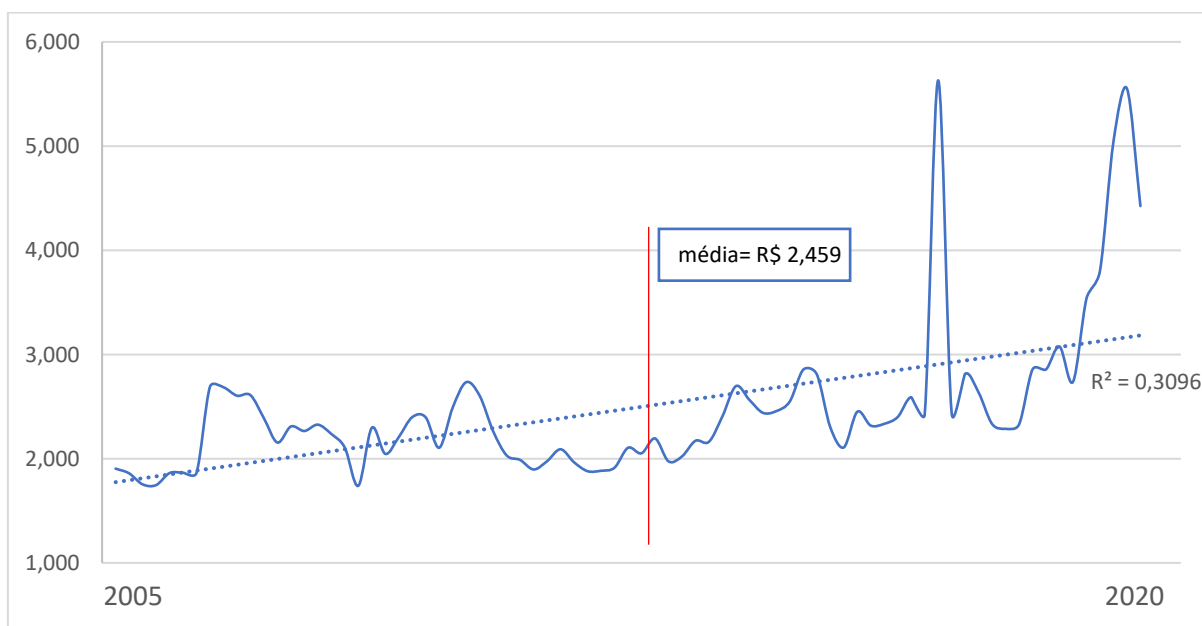


Fonte: BCB (2020)

Legenda: no eixo x está o tempo (anos) e no eixo y a inflação (%)

O preço do biodiesel foi estimado com base na série histórica dos preços médios de venda no Brasil pelos leilões da ANP (2020), desde o leilão N°1 em 2005 ao N°77 em 2020, como mostra a Figura 3 com uma tendência de alta. A média de preço obtida foi R\$ 2,459 L⁻¹.

Figura 3 - Histórico de preços do biodiesel no Brasil

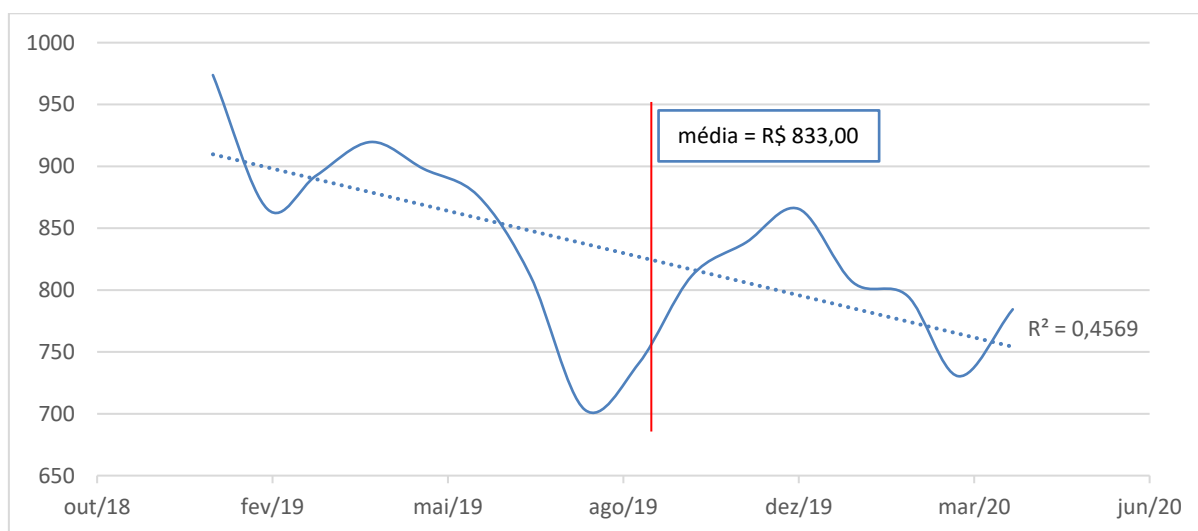


Fonte: ANP (2020)

Legenda: no eixo x está o tempo (anos) e no eixo y o preço do biodiesel (R\$ L⁻¹)

O preço da glicerina para venda foi estimado através da série de outubro de 2018 a junho de 2020 (ANP, 2020), como mostra a Figura 4, onde também há uma tendência de queda e o valor médio é R\$ 833,00 ton^{-1} .

Figura 4 - Preço da glicerina para venda no Brasil



Fonte: ANP (2020)

Legenda: no eixo x está o tempo (anos) e no eixo y o preço de venda da glicerina (R\$ ton^{-1})

3.3.2 Análise estatística sobre os pressupostos econômicos

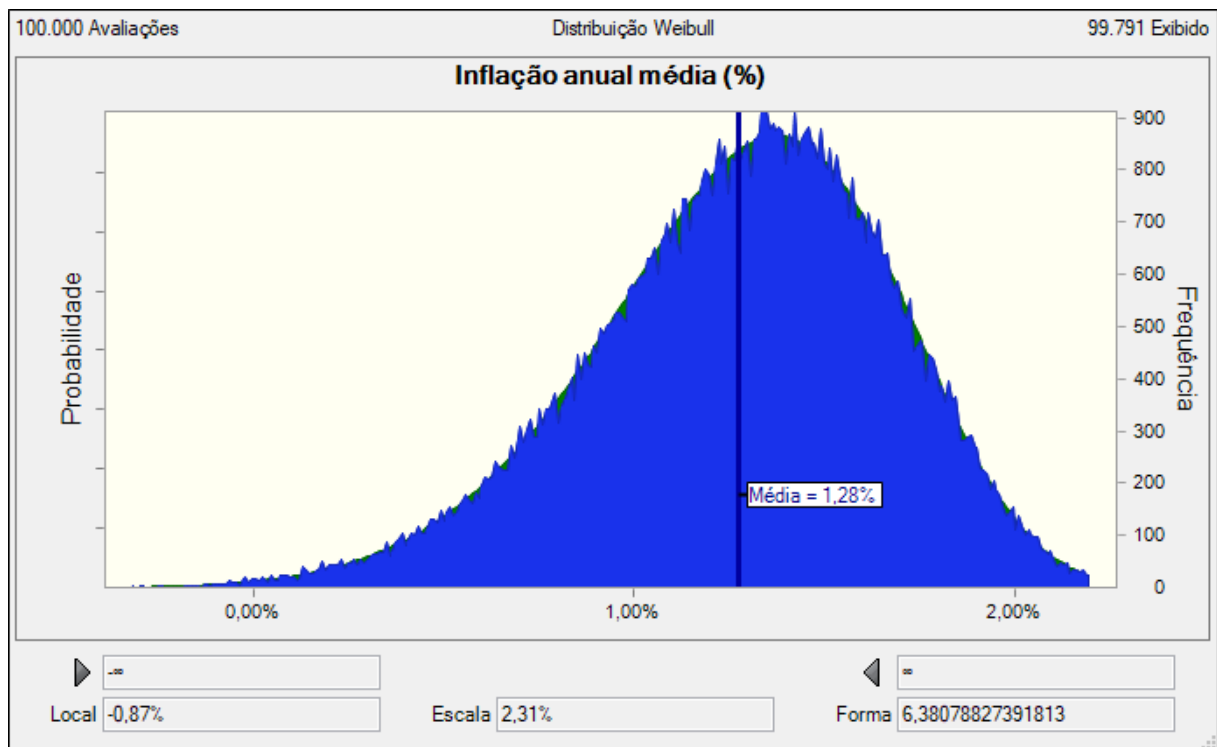
Após 100.000 avaliações, os pressupostos econômicos tiveram as suas distribuições de probabilidade ajustadas aos dados históricos. A “inflação anual média” e o “preço da glicerina” foram ajustados através da distribuição Weibull, segundo o método de classificação Anderson-Darling. A distribuição Weibull é essencialmente a maior distância vertical entre as duas distribuições acumulativas, ponderando as diferenças entre as duas distribuições em suas caudas maiores que seus intervalos médios. O peso das caudas ajuda a corrigir a tendência do método Kolmogorov-Smirnov para enfatizar discrepâncias na região central.

A distribuição Weibull é largamente usada na prática da engenharia, como discutido por Prabhakar, Xie e Jiang (2005). Os parâmetros desta distribuição são: **Local** (L), onde $-\infty < L < +\infty$; **Escala** (s), onde $s > 0$; e **Forma** (β), onde $\beta > 0$. A função matemática que descreve a distribuição Weibull na Função densidade de probabilidade (PDF) é (Eq. 3):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{s} \left(\frac{x-L}{s} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-L}{s} \right)^\beta}, & \text{para } x \geq L \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Para a distribuição Weibull da “inflação anual média” (Figura 5), os parâmetros foram: Local = -0,87%; Escala = 2,31%; e Forma = 6,38078827391813.

Figura 5 - Distribuição Weibull da “inflação anual média”

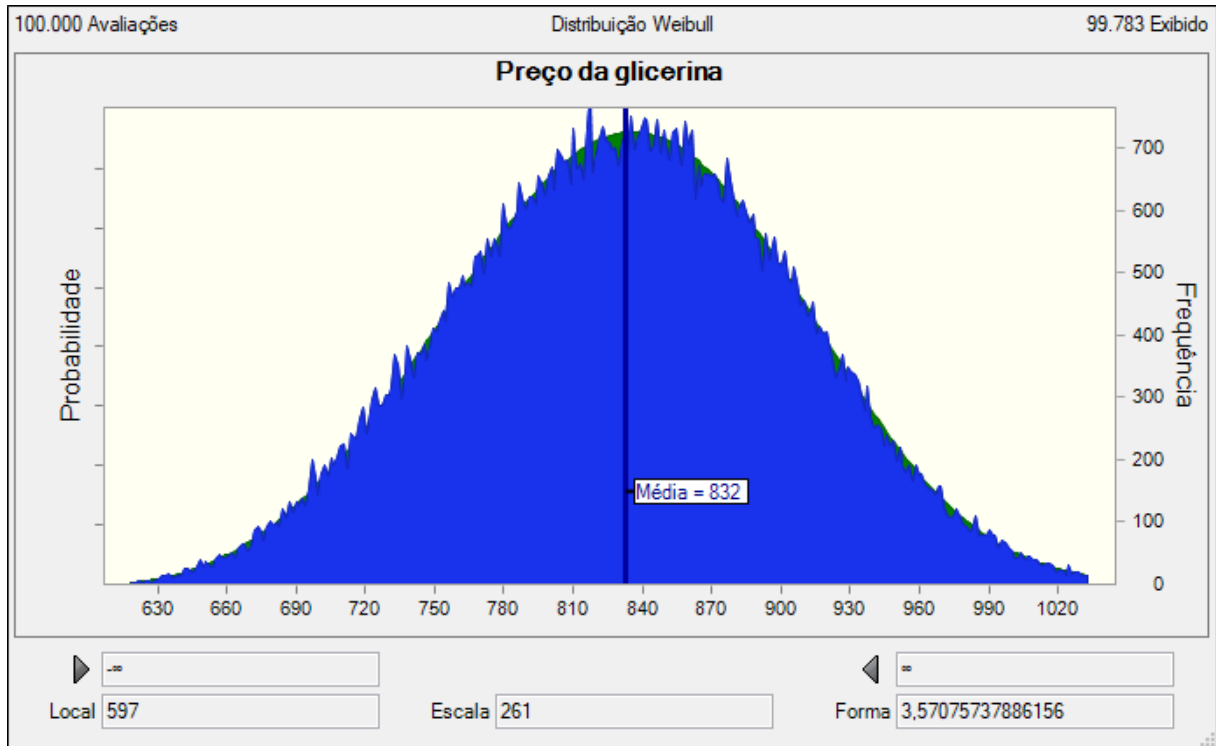


Fonte: o autor

Legenda: o eixo x estão os valores da inflação anual média (%) e no eixo y a probabilidade de ocorrência e a frequência com que ocorreram nas avaliações

Para a distribuição Weibull do “preço da glicerina” (Figura 6), os parâmetros foram: Local = 597; Escala = 261; e Forma = 3,57075737886156.

Figura 6 - Distribuição Weibull do “preço da glicerina”



Fonte: o autor

Legenda: no eixo x estão os valores do preço de venda da glicerina (R\$ ton⁻¹) e no eixo y a probabilidade de ocorrência e a frequência com que ocorreram nas avaliações

O pressuposto “preço do biodiesel” foi classificado pelo mesmo método Anderson-Darling, ajustado através da distribuição Lognormal, que é frequentemente usada na modelagem econômica para análise de risco devido à versão “produto do efeito limite central”, como discutido por Prabhakar, Xie e Jiang (2005). Os parâmetros da distribuição Lognormal são: **Média** (μ_L), onde $\mu_L > 0$; e **Desvio Padrão** (σ_L), onde $\sigma_L > 0$. A função matemática que rege a distribuição Lognormal na PDF é (Eq. 4):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(\ln x - \mu^2/2\sigma^2)} & \text{para } x > 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

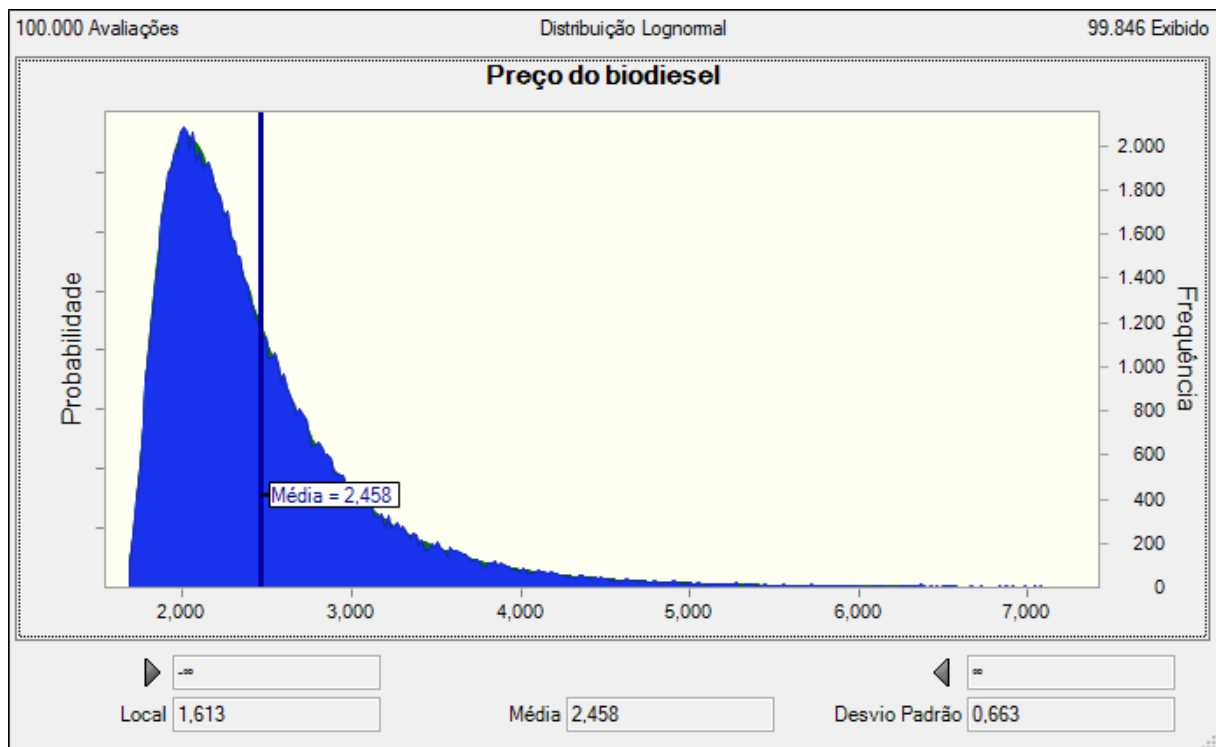
onde,

$$\mu = \ln \mu_L - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\sigma_L^2}{\mu_L^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln \left(1 + \frac{\sigma_L^2}{\mu_L^2} \right)} \quad (6)$$

Para a distribuição Lognormal do “preço do biodiesel” (Figura 7), os parâmetros foram: Local = 1,613; Média = 2,458; e Desvio padrão = 0,663.

Figura 7 - Distribuição Lognormal do “preço do biodiesel”



Fonte: o autor

Legenda: no eixo x estão os preços de venda do biodiesel (R\$ L⁻¹) e no eixo y a probabilidade de ocorrência e a frequência com que ocorreram nas avaliações

Os demais pressupostos (produção anual de lipídio; produção anual de glicerina, produção anual de energia elétrica; rendimento da transesterificação; e a tarifa média anual) foram ajustados através da distribuição Triangular (Tabela 6), que é frequentemente usada como distribuição aproximada na ausência de dados, como discutido em Johnson (1997).

Os parâmetros da distribuição triangular são: **Mínimo** (a), onde $-\infty < a < +\infty$; **Mais provável** (m), onde $-\infty < a \leq m < +\infty$; e **Máximo** (b), onde $-\infty < a \leq m \leq b < +\infty$. A função matemática que rege a distribuição triangular na PDF é (Eq. 7):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)} & \text{para } a \leq x \leq m \\ \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} & \text{para } m \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

Tabela 6 - Pressupostos de modelo com distribuição Triangular

Pressuposto		Gráfico
Produção anual de lipídio (L)		
Mínimo	3,41E+7	
Mais provável	3,79E+7	
Máximo	4,16E+7	
Produção anual de glicerina (ton.)		
Mínimo	2,70E+03	
Mais provável	3,00E+03	
Máximo	3,30E+03	
Produção anual de energia elétrica (GWh)		
Mínimo	1,33	
Mais provável	1,48	
Máximo	1,63	
Rendimento da transesterificação		
Mínimo	90%	
Mais provável	93%	
Máximo	95%	
Tarifa de energia industrial (R\$ kWh⁻¹)		
Mínimo	0,279	
Mais provável	0,310	
Máximo	0,341	

Fonte: o autor

Por fim, para reforçar a análise, foram utilizadas técnicas de investimento VPL e TIR. A análise de sensibilidade identifica as variáveis que exercem maior impacto na produção do biodiesel e conseqüentemente no fluxo de caixa. Para o cálculo do VPL e TIR, foram utilizadas as Eqs. 8 e 9.

$$VPL = \sum_{j=1}^n F_j \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1 + TIR)^j} - investimento\ inicial = 0 \quad (9)$$

onde, “ F ” é o fluxo de caixa, “ j ” é o período de cada fluxo de caixa e “ n ” é o período final do investimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise econômica foi feita aplicando técnicas de SMC, através do *software* Oracle Crystal Ball® Versão 11.1.2.4.900 (64bits) integrado ao Microsoft Excel Versão 2101 (build 13628.20274) como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica. As SMCs foram realizadas com 100 mil execuções (determinadas através de um estudo de convergência), com tempo projetado para 20 anos para a produção de “biodiesel + glicerina” no processo convencional e “biodiesel + glicerina + energia elétrica” no processo integrado biodiesel-biogás.

Para o processo convencional de produção, os resultados das simulações mostram um VPL positivo de R\$ 167,1 milhões e uma TIR de 13,80%, o que significa que o processo convencional se revela viável economicamente. O valor do eixo x que ocorreu com mais frequência é aprox. R\$ 57,5 milhões. Isto significa que esse é o valor mais provável do VPL no cenário de produção convencional de biodiesel e glicerina.

Já no processo biodiesel-biogás o VPL foi de R\$ 499,2 milhões e uma TIR de 25,25%. O valor mais provável nesse caso é de aprox. R\$ 402,9 milhões. Isto mostra que a integração biodiesel-biogás aumentou consideravelmente a TIR em relação ao processo convencional. A Figura 8 representa a comparação entre as duas distribuições de frequências dos valores de VPL.

O gráfico, intitulado 'Exibição de Frequência', apresenta a distribuição de custos para dois tipos de VPL. O eixo horizontal representa o custo em milhões de reais (R\$), variando de R\$0,00 a R\$900.000.000,00. O eixo vertical representa a probabilidade, variando de 0,00 a 0,01. A distribuição para VPL (convencional) é mostrada em azul, com um pico mais cedo e menor. A distribuição para VPL (biodiesel-biogás) é mostrada em marrom, com um pico mais tarde e maior. Linhas verticais indicam os pontos mais prováveis e a média para cada distribuição.

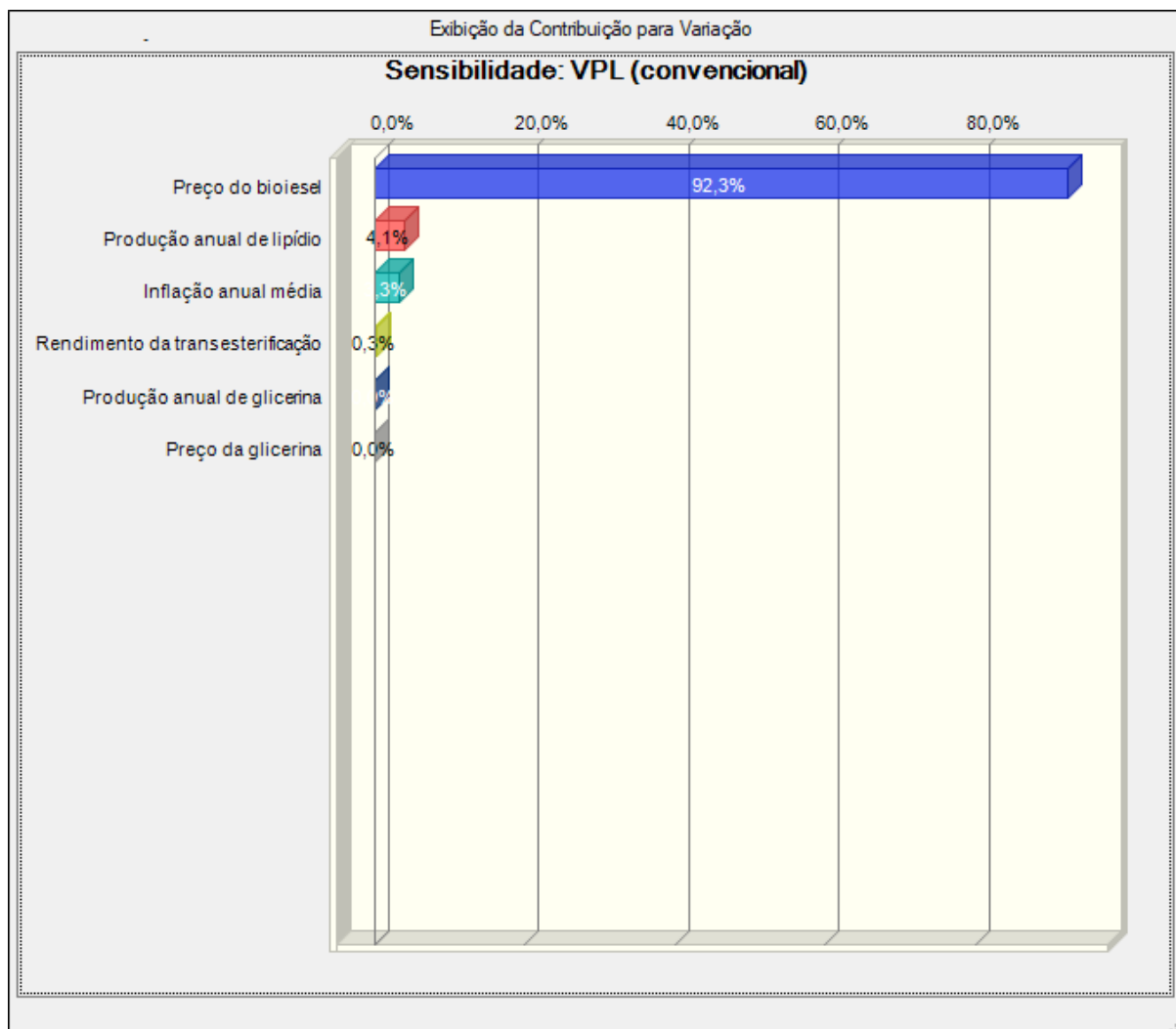
Parâmetro	VPL (biodiesel-biogás)	VPL (convencional)
Mais provável	R\$ 402,9 milhões	R\$ 57,5 milhões
Média	R\$ 499,2 milhões	R\$ 167,1 milhões

Legenda: no eixo x estão as estimativas de VPL geradas pelo simulador e no eixo y a probabilidade de ocorrência

A análise de sensibilidade (Figura 9) mostra uma grande dependência entre o VPL (convencional) e o pressuposto “preço do biodiesel” com 92,3%. Ou seja, este pressuposto é o que mais impacta na economia do projeto convencional. A “produção anual de lipídio” impacta somente 4,1%, a “inflação anual média 3,3% e o “rendimento da transesterificação 0,3%. A variação dos demais pressupostos não interferem no VPL (convencional).

35

Figura 9 - Gráfico de sensibilidade do VPL (convencional)

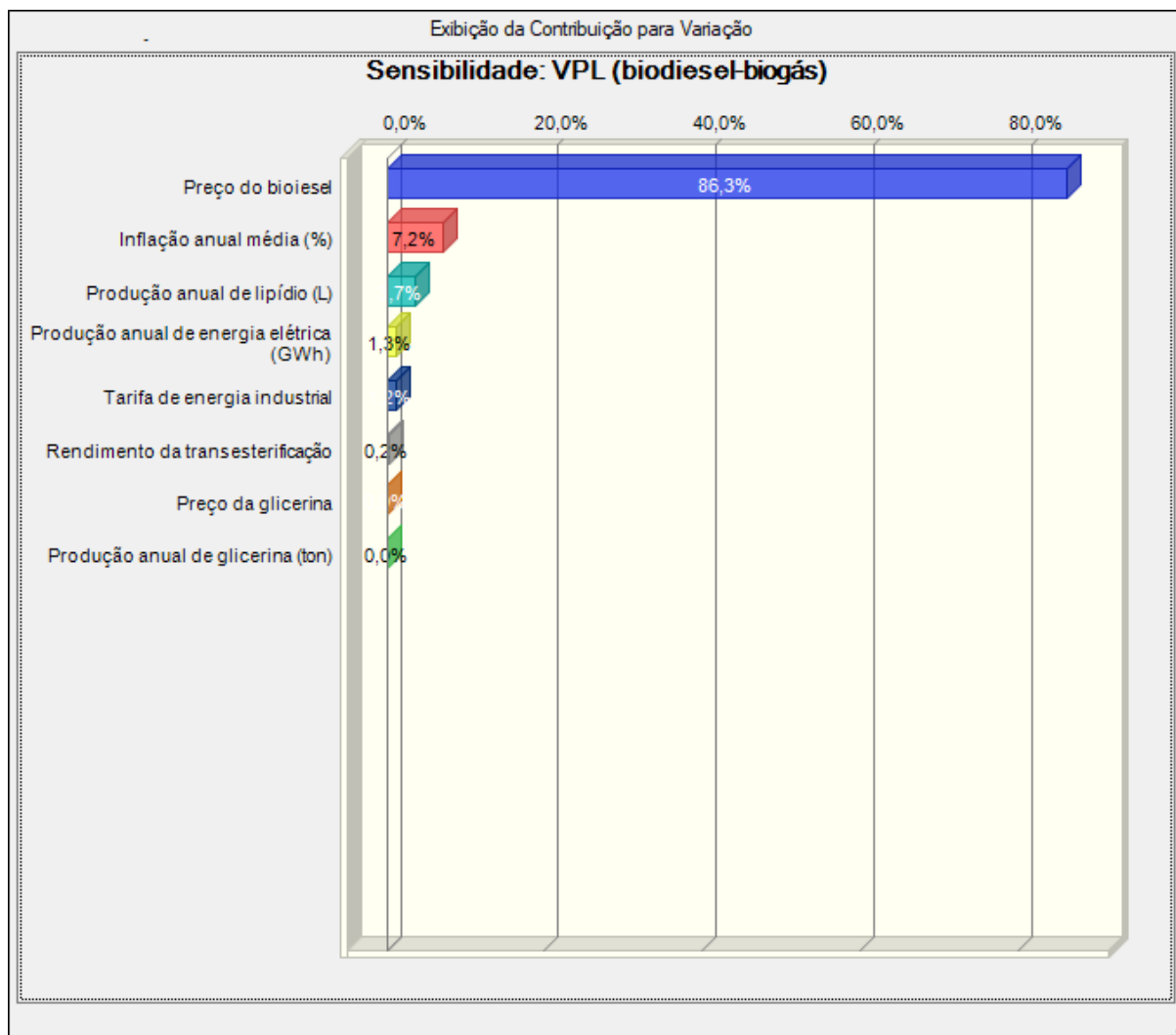


Fonte: o autor

Legenda: o eixo x representa o impacto de cada pressuposto no VPL (convencional) (em %) e no eixo y os pressupostos avaliados

A análise de sensibilidade (Figura 10) mostra que a integração biodiesel-biogás diminuiu a dependência entre o VPL e o pressuposto “preço do biodiesel” atenuando o percentual de 92,3% para 86,3% (uma redução de 6 pontos percentuais). Porém, este pressuposto continua sendo o que mais impacta na economia do projeto. No cenário biodiesel-biogás, a “inflação anual média” contribui com 7,2%, seguida da “produção anual de lipídio” com 3,7%, “produção anual de energia elétrica” com 1,3%, “tarifa de energia industrial” com 1,2%, “rendimento da transesterificação 0,2%, e os pressupostos não contribuem para a variação do VPL (biodiesel-biogás).

Figura 10 - Gráfico de sensibilidade do VPL (biodiesel-biogás)



Fonte: o autor

Legenda: o eixo x representa o impacto de cada pressuposto no VPL (biodiesel-biogás) (em %) e no eixo y os pressupostos avaliados

Ainda assim, o preço do biodiesel domina a influência sobre o VPL e isto nos leva a pensar sobre como um projeto de biodiesel em larga escala está atrelado a políticas de preços dos biocombustíveis no Brasil, sendo necessário, portanto, o aprofundamento nas discussões sobre o tema.

No trabalho realizado por Bravo-Fritz *et al.* (2016), os autores fizeram uma abordagem econômica multicenário da geração de eletricidade através da DA dos compostos presentes na biomassa de microalgas, achando um VPL negativo para todos os casos, exceto para a venda de proteínas concentradas. Os autores estimaram uma produção no Chile, numa escala de produção, apenas 1,75 milhões de litros de lipídios e cultivo em lagoas abertas, não

considerando os custos sobre a área (que representa 10% do subtotal Capex no presente trabalho).

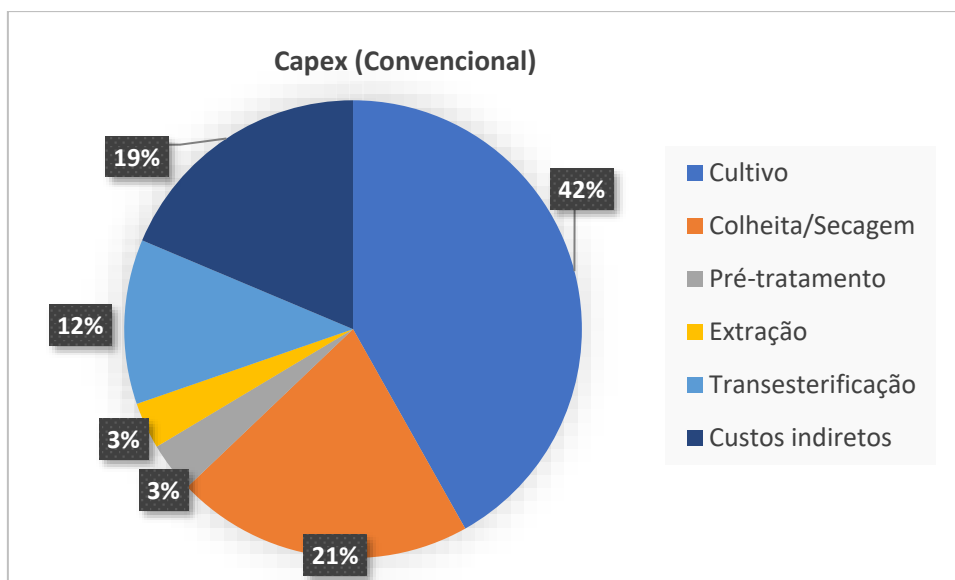
No processo biodiesel-biogás, o VPL é também sensível à inflação anual média, isto ocorre devido ao fato das tarifas de energia industrial serem mais influenciadas pela inflação. Esse também pode ser um ponto que precisa ser mais bem discutido, pois as tarifas de energia no Brasil carregam peculiaridades importantes tais como as diferenças na forma de cobrança em cada estado da federação, na carga de impostos incidente e nas faixas de consumo, fazendo com que a localidade, seja uma importante variável de decisão.

Outro aspecto importante é a forma como a energia elétrica pode alimentar o processo. No modelo deste trabalho, a energia produzida foi monetizada e esse valor considerado como receita no fluxo de caixa. Uma opção seria quantificar o dispêndio de energia em cada etapa produtiva e adicionar a energia gerada, calculando-se somente o balanço energético e seu impacto no custo.

Uma limitação do presente estudo foi não incluir no modelo econômico os aspectos da seleção da cepa de microalgas. No processo de produção do biodiesel de microalgas, a seleção da cepa é fundamental, pois a partir desta, todo o dimensionamento da produção pode ser calculado (p.ex. a quantidade de luz, nutrientes e CO₂ a ser fornecido ao cultivo). Outros parâmetros operacionais também variam conforme a cepa selecionada (p.ex. temperatura, pH e salinidade), influenciando na quantidade e qualidade de biodiesel, como discutido por Chisti (2007a). Sobre esta etapa, pretende-se incluir no modelo econômico em estudos futuros.

As Figuras 11 e 12 mostram os gráficos de alocação de capital específica nos dois processos. Nota-se que a inclusão do módulo de integração biodiesel-biogás melhor distribui as despesas de capital. No entanto, para ambos os casos as despesas com o cultivo, sobretudo o custo dos PBRs, compõem grande parte do Capex, trazendo à tona a importância de novas tecnologias de cultivo que atenuem o custo dos PBRs.

Figura 11 - Gráfico da alocação de capital específica (%) no processo convencional



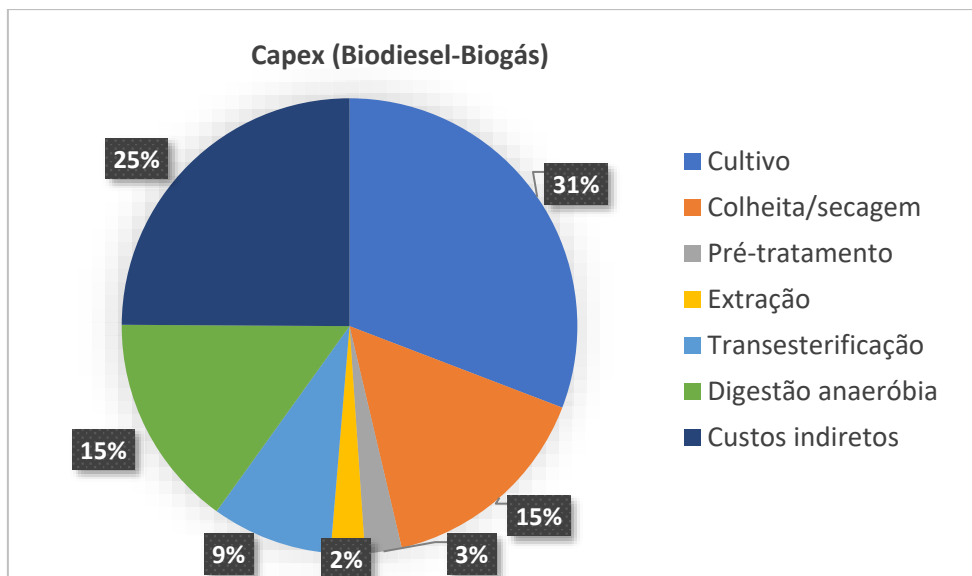
Fonte: o autor

Batan, Graff e Bradley (2016) utilizaram uma escala de produção anual de 37,85 milhões de litros de biodiesel. A análise é feita em termos Capex e Opex. Os autores relataram que os altos custos para a produção dos reatores podem ser compensados com a produção de coprodutos de maior valor do que biodiesel bem como a utilização de novas tecnologias que aumentem a produtividade e/ou reduzam os custos de produção.

Ou-Yang *et al.* (2018) avaliaram o valor da cadeia de bioenergia de microalgas cultivadas em PBR com a captura de CO₂ produzido numa central elétrica a carvão. O estudo revelou que é possível capturar 231,4 toneladas de CO₂ por ano para cada hectare de produção de algas. Na mesma esteira, Baudry, Macharis e Vallée (2018) sugerem que o biodiesel de microalgas pode contribuir com os objetivos de sustentabilidade no setor de transportes na França em cenário projetado para 2030. Tendo em vista o potencial de fixação de carbono pelas microalgas, um outro ponto que pode ser melhor discutido é o possível aumento das receitas através da política de créditos de carbono, que é discutida no RenovaBio (RENOVABIO).

Santibañez-Aguilar *et al.* (2016) relataram que o comportamento probabilístico dos valores de lucro não está apenas associado ao comportamento do preço da matéria-prima e sim a toda cadeia logística. Portanto, considerar a cadeia de suprimentos na modelagem econômica, enriquecerá a avaliação dos projetos com microalgas no Brasil.

Figura 12 - Gráfico da alocação de capital específica (%) no processo biodiesel-biogás



Fonte: o autor

Apartir dos gráficos, observa-se que a alocação de capital na DA é de 15%, valor semelhante ao relatado por Bravo-Fritz *et al.* (2016), que estimaram esta porcentagem em 12% quando utilizada cepas de *Tetraselmis* sp. e 16% para a *Isochrysis* sp.

5 CONCLUSÕES

O futuro do planeta depende da utilização de energias mais limpas. O biodiesel produzido a partir de microalgas é uma alternativa às fontes não-renováveis. Este estudo conduziu de forma preliminar uma análise técnica e econômica da integração entre o biodiesel e o biogás, trazendo uma abordagem probabilística e ampliando a discussão sobre a viabilidade de projetos de grande escala no Brasil.

O trabalho mostra que a integração é vantajosa economicamente, pois melhorou a TIR de 13,80% para 25,25% e substancialmente o VPL de R\$ 57,5 milhões para R\$ 402,9 milhões, considerando as maiores chances de ocorrência após simulação com 100 mil avaliações. A análise de sensibilidade aponta para uma elevada dependência do projeto ao preço do biodiesel e ao alto custo dos PBRs, indicadores que merecem uma atenção especial para a melhoria da saúde financeira dos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

RANP 45 - 2014. Brasil, ago., 2014. Disponível em:

<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2014/agosto&item=ranp-45-2014>.

Acesso em: 21 jan. 2020.

_____. RENOVABIO. Brasil, dez, 2016. Disponível em:

<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 22 out. 2020.

_____. Histórico de preços de venda do biodiesel. Brasil, 2020. Disponível em:

<http://www.anp.gov.br/dados-abertos-anp> Acesso em 12 nov. 2020.

ACIÉN, F. G. *et al.* 1 - Photobioreactors for the production of microalgae. In: Gonzalez-Fernandez, C.; Muñoz, R. Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products (Woodhead Publishing Series in Energy). 1. ed. Woodhead Publishing, 2017. p. 1-44.

ANDERSON, Ian. Songs From The Wood. In: Jethro Tull. Songs From The Wood. Londres: Morgan Studios, 1977. 1 CD. Faixa 1 (4 min 52 s). Disponível em:

<https://www.letras.mus.br/jethro-tull/19903/traducao.html>. Acesso em: 05 jun. 2020.

ASLAN, S.; KAPDAN, I. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*, v. 28, n. 1, p. 64-70, nov. 2006.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Histórico de taxas de juros. Brasil, 2020. Disponível em:

<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BATAN, L. Y.; GRAFF, G. D.; BRADLEY, T. H. Techno-economic and Monte Carlo probabilistic analysis of microalgae biofuel production system. *Bioresource Technology*, v. 219, p. 45-52, nov. 2016.

BAUDRY, G.; MACHARIS, C.; VALLÉE, T. Can microalgae biodiesel contribute to achieve the sustainability objectives in the transport sector in France by 2030? A comparison between first, second and third generation biofuels through a range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. *Energy*, v. 155, p. 1032-1046, jul. 2018.

BRAVO-FRITZ, C. P. *et al.* Multi-scenario energy-economic evaluation for a biorefinery based on microalgae biomass with application of anaerobic digestion. *Algal Research*, v. 16, p. 292-307, jun. 2016.

BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 557-577, 2010.

CHEALI, P. *et al.* Economic risk analysis and critical comparison of optimal biorefinery concepts. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 10, n. 4, p. 435-445, jul. 2016.

- CHEN, J. *et al.* Microalgal industry in China: challenges and prospects. *Journal of Applied Phycology*, v. 28, n. 2, p. 715-725, 2016.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, p. 294-306, 2007a.
- _____. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2007b.
- DAVIS, R.; ADEN, A.; PIENKOS, P. T. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*, v. 88, p. 3524-3531, 2011.
- DE-BASHAN, L. *et al.* Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research*, v. 36, p. 2941-2948, 2002.
- ENAMALA, M. K. *et al.* Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 49-68, 2018.
- GONZALEZ-FERNANDEZ, C.; SIALVE, B.; MOLINUEVO-SALCES, B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*, v. 198, p. 896-906, dez. 2015.
- HALIM, R.; DANQUAH, M.; WEBLEY, P. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, v. 30, n. 3, p. 709-732, 2012.
- HALIM, R.; DANQUAH, P. M.; WEBLEY, P. A. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, v. 30, n. 3, p. 709-732, jun. 2012.
- HARUN, R. *et al.* Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 741-747, 2011.
- JANKOWSKA, E.; SAHU, A.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 75, p. 692-709, 2017.
- JOHNSON, D. The triangular distribution as a proxy for the beta distribution in risk analysis. *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 46, n. 3, p. 387-398, 1997.
- KOLLER, M. Design of Closed Photobioreactors for Algal Cultivation. In: Prokop, A.; Bajpai, R.; Zappi, M. *Algal Biorefineries*. Suíça: Springer, 2015. p. 133-186.
- LEE, J-C. *et al.* Techno-economic assessment of conventional and direct-transesterification processes for microalgal biomass to biodiesel conversion. *Bioresource Technology*, v. 294, p. 122173, 2019.
- LI, X. *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalgae *Scenedesmus* sp. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 14, p. 5494-5500, jul. 2010.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.

MARTINEZ, M. *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*, v. 73, n. 3, p. 263-272, jul. 2000.

MILANO, J. *et al.* Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 180-197, maio 2016.

MIORANDO, Rogério Feroldi. Modelo econômico-probabilístico de análise de risco em projetos de TI. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

NAGABALAJI, V. *et al.* Nutrient removal from synthetic and secondary treated sewage and tannery wastewater through phycoremediation. *Environmental Technology*, p. 1-9, 2017.

NAGARAJAN, S. *et al.* An updated comprehensive techno-economic analysis of algae biodiesel. *Bioresource Technology*, v. 145, p. 150-156, 2013.

OLIVEIRA, Bruno Alves de. Análise da viabilidade técnica e econômica da produção modular de biodiesel de microalgas. 2020. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31414/EM.2020.D.131111> Acesso em: 8 maio 2020.

OU-YANG, C. *et al.* Value chain analysis of algal bioenergy and carbon capture integrated with a biotechnology innovation. *Journal of Cleaner Production*, v. 180, p. 349-359, abr. 2018.

PRABHAKAR, D. N.; XIE, M.; JIANG, R. Weibull Models. *Journal of the American Statistical Association*. v.100, p.1094, 2005.

RICHARDSON, J. W. *et al.* A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability. *Algal Research*, v. 4, n. 1, p. 96-104, 2014a.

_____. *et al.* Harvesting and extraction technology contributions to algae biofuels economic viability. *Algal Research*, v. 5, n. 1, p. 70-78, 2014b.

_____.; OUTLAW, J. L.; ALLISON, M. The economics of microalgae oil. *AgBioForum - Journal of Agrobiotechnology Management & Economics*, v. 13, n. 2, p. 119-130, 2010. Disponível em: <http://www.agbioforum.org/v13n2/v13n2a04-richardson.htm>. Acesso em: 19 nov. 2020.

_____.; ALLISON, M; OUTLAW, J. L. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Research*, v. 1, n. 1, p. 93-100, maio 2012.

SAMANEZ, Carlos Patrício. Engenharia Econômica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTIBAÑEZ-AGUILAR, J. E. *et al.* Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 136, p. 224-245, nov. 2016.

SIALVE, B.; BERNET, N.; BERNARD, O. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, v. 27, n. 4, p. 409-416, 2009.

TURTON *et al.* Analysis, synthesis and design of chemical processes. Pearson Education. 4^a ed., New Jersey, 2013.

WARD, A.; LEWIS, D.; GREEN, F. Anaerobic digestion of algae biomass: A review. *Algal Research*, v. 5, p. 204-214, jul. 2014.

XIA, Y.; TANG, Z.-C. A novel perspective for techno-economic assessments and effects of parameters on techno-economic assessments for biodiesel production under economic and technical uncertainties. *RSC Advances*, v. 7, n. 16, p. 9402-9411, 2017.